

Beschreibung

Halbleiter-Leistungsschalter sowie dafür geeignetes Herstellungsverfahren

5

Die Erfindung betrifft einen Halbleiter-Leistungsschalter sowie ein dafür geeignetes Herstellungsverfahren.

10

Halbleiter-Leistungsschalter finden sich in einer Vielzahl von Geräten in unserer unmittelbaren Umgebung und erweisen dort ihre Dienste, beispielsweise bei der Steuerung und Regelungen von Lasten bis zu mehreren Kilowatt in Lampen, Motoren oder Heizungen. Auch in der Automobiltechnik wird sich in Zukunft immer mehr Leistungselektronik verbergen, um dem Wunsch nach komfortablen, elektronisch regelbaren Einstellmöglichkeiten nachzukommen.

15

20

Halbleiter-Leistungsschalter sind mittlerweile in der Lage, Spannungen bis zu 1000 V und Stromdichten bis zu 2000 A/cm² zu verarbeiten. CoolMOS-Leistungsschalter erreichen Stromdichten von 2000 A/cm² und Einschaltwiderstand-Bestwerte von ca. 20 m Ω mm². Ähnliche Leistungsdaten lassen sich auch mit anderen Silizium-basierenden Halbleiter-Leistungsschaltern erreichen. Die Erzielung eines möglichst geringen Einschaltwiderstandes ist dabei vorrangiges Ziel, da auf diese Weise die auftretenden Verlustleistungen beträchtlich gesenkt werden können.

25

30

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe ist, einen Halbleiter-Leistungsschalter anzugeben, mit dem die oben genannten Einschaltwiderstandswerte weiter verbessert werden können.

35

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung einen Halbleiter-Leistungsschalter gemäß Patentanspruch 1 bereit. Ferner stellt die Erfindung ein Verfahren zur Verbesserung der Sperrwirkung eines erfindungsgemäßen Halbleiter-

Leistungsschalters gemäß Patentanspruch 18 bereit. In Patentanspruch 19 wird ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Leistungsschalters beschrieben. Vorteilhafte Ausgestaltungen bzw. Weiterbildungen des Erfindungsgedankens finden
5 sich in jeweiligen Unteransprüchen.

Der erfindungsgemäße Halbleiter-Leistungsschalter weist einen Sourcekontakt, einen Drainkontakt, eine zwischen Sourcekontakt und Drainkontakt vorgesehene Halbleiterstruktur und ein
10 Gate, über das ein Stromfluss zwischen Sourcekontakt und Drainkontakt durch die Halbleiterstruktur hindurch steuerbar ist, auf. Die Halbleiterstruktur weist mehrere parallel geschaltete Nanodrähte auf, die so angeordnet sind, dass jeder Nanodraht eine elektrische Verbindung zwischen dem Sourcekon-
15 takt und dem Drainkontakt ausbildet.

Durch die Verwendung von Nanodrähten können Halbleiter-Leistungsschalter gewonnen werden, deren flächenbezogener Einschaltwiderstand um Größenordnungen kleiner, und dabei er-
20 zielte maximale Stromdichten um Größenordnungen größer sind als bei herkömmlichen Leistungsschaltern: So ist bei einer Nanodrahtdichte von 100 Nanodrähten/ μm^2 der Einschaltwiderstand bereits um den Faktor 20 geringer und die maximale Stromdichte um den Faktor 100 größer als bei herkömmlichen
25 Halbleiter-Leistungsschaltern, beispielsweise Silizium-Leistungsschaltern. Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters ist, dass aufgrund interner Streueffekte der Kurzschlussstrom innerhalb eines einzelnen Nanodrahts begrenzt wird, bei einer Kohlenstoff-Nanoröhre
30 beispielsweise auf etwa 24 μA . Der erfindungsgemäße Halbleiter-Leistungsschalter kann demnach auch als Anlaufstrombegrenzer eingesetzt werden.

Zum besseren Verständnis der Erfindung sei im Folgenden kurz
35 auf die physikalischen Eigenschaften von Nanodrähten eingegangen. Nanodrähte sind eindimensionale Strukturen, die metallische Eigenschaften bzw. Halbleitereigenschaften aufwei-

sen können. "Eindimensional" bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich aufgrund der kleinen Abmessungen der Nanodrähte (Nanometerbereich) die einzelnen Energieniveaus der Elektronen weiter als die thermische Energie (~ 25 meV) auseinander-
5 liegen, so dass sich Elektronen nur in einem Leitungskanal aufhalten. Nanodrähte können beispielsweise Röhren (innen "hohl", dünne Drähte (mit Material "gefüllt"), dünne Flächen oder auch einzelne Atomketten sein.

10 In dieser Erfindung werden die elektronischen Eigenschaften der Nanodrähte, beispielsweise Kohlenstoff-Nanoröhren oder andere eindimensionale Strukturen, benützt, um Bauelemente der Leistungselektronik (Schalten von mehreren Ampère) zu erzeugen, die durch ihren nanostrukturierten Aufbau eine we-
15 sentlich bessere Performanz erzielen als konventionelle Leistungs-Bauelemente. Erfindungsgemäß können also wesentlich höhere Ströme/Spannungen als bei herkömmlichen Nanoelektronikbauelementen ($0,1 - 5$ V, $25 \mu\text{A}$) verarbeitet werden, beispielsweise Spannungen bis mehr als 500 V und Ströme von mehr
20 als 2000 A/cm^2 . Ausschlaggebend ist dabei die Kombination aus einer Parallelschaltung mehrerer Nanodrähte und der hohen Ladungsträgermobilität in diesen eindimensionalen Gebilden, verbunden mit einer Skalierungsvorschrift für die Länge dieser Nanodrähte.

25 Die im erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalter eingesetzten Nanodrähte können prinzipiell eine beliebige Struktur aufweisen und bestehen aus Material mit Halbleitereigenschaften, beispielsweise Silizium oder Kohlenstoff, wobei
30 bei erfindungsgemäß insbesondere Kohlenstoff-Nanoröhren Verwendung finden. Der geringe Einschaltwiderstand, der sich mit Nanodrähten erzielen lässt, beruht darauf, dass Elektronen, die durch einen Nanodraht geleitet werden, statistisch mit einer sehr viel geringeren Wahrscheinlichkeit gestreut werden
35 als Elektronen, die durch einen ausgedehnten Halbleiterkristall hindurchfließen. So zeigen z. B. Kohlenstoff-Nanoröhren

die höchste je bei Raumtemperatur gemessene Mobilität von über 100000 cm²/Vs.

Die Länge der Nanodrähte beträgt vorzugsweise ((0,2 µm) *
5 (Maximalwert der an dem Halbleiter-Leistungsschalter anliegenden Spannung in Volt)). Die Erfindung ist jedoch nicht auf diese Faustregel beschränkt.

Die Parallelschaltung der Nanodrähte lässt sich auf mehrerlei
10 Arten realisieren. Vorzugsweise sind die Nanodrähte als "Stäbchen" ausgebildet, die parallel zueinander verlaufen, wobei ein Ende eines jeden Stäbchens den Sourcekontakt, und das andere Ende den Drainkontakt kontaktiert. Die Nanodrähte müssen jedoch nicht zwingend eine stäbchenförmige Ausgestaltung aufweisen, auch krummlinige Formen sind prinzipiell möglich.
15 Wichtig ist, dass jeder Nanodraht eine eigenständige elektrische Verbindung zwischen Sourcekontakt und Drainkontakt herstellt, so dass eine Parallelschaltung elektrischer Verbindungen zwischen Source- und Drainkontakt besteht.

20 Das Gate des Halbleiter-Leistungsschalters ist in einer ersten bevorzugten Ausführungsform in Form einer Gateschicht realisiert, die zwischen dem Sourcekontakt und dem Drainkontakt vorgesehen ist, und die von den Nanodrähten durchsetzt wird.
25 Die Nanodrähte sind gegenüber der Gateschicht elektrisch isoliert. Die Gateschicht wird in dieser Ausführungsform also durch die Nanodrähte "durchstoßen".

In einer zweiten bevorzugten Ausführungsform ist das Gate in
30 Form mehrerer Gatebänder realisiert, deren Längsausrichtung jeweils senkrecht zur Ausrichtung der Nanodrähte verläuft, und deren Querausrichtung der Ausrichtung der Nanodrähte entspricht, wobei die Nanodrähte gegenüber dem Gate, d. h. den Gatebändern, elektrisch isoliert sind. In dieser Ausführungsform wird das Gate also nicht durch die Nanodrähte durchstoßen,
35 vielmehr verlaufen die Nanodrähte parallel zu Oberflächen der Gatebänder. Vorzugsweise verlaufen die Nanodrähte

innerhalb von Nanodraht-Gräben, die zwischen den Gatebändern vorgesehen sind, d. h. Nanodraht-Gräben und Gatebänder wechseln miteinander ab.

- 5 Prinzipiell können die Gatebänder und/oder Gräben beliebig voneinander beabstandet sein, vorzugsweise sind die Gatebänder und/oder die Nanodraht-Gräben jedoch äquidistant voneinander beabstandet.
- 10 Innerhalb der Nanodraht-Gräben können Röhren vorgesehen werden, innerhalb derer jeweils wenigstens ein Nanodraht verläuft; vorzugsweise verlaufen innerhalb einer Röhre mehrere Nanodrähte. Die Röhren dienen hierbei als Führung während des Aufwuchsprozesses der Nanodrähte.
- 15 Zur Isolation der Nanodrähte gegenüber den Gatebändern können beispielsweise zwischen den Nanodraht-Gräben und den Gatebändern Isolationsschichten vorgesehen werden.
- 20 Die Nanodrähte sollten insbesondere in der Ausführungsform, in der das Gate in Form einer Gateschicht realisiert ist, gegeneinander isoliert und gleichmäßig voneinander beabstandet sein. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig, insbesondere nicht im Falle der zweiten Ausführungsform, in der das Gate
- 25 in Form mehrerer Gatebänder realisiert ist. Dort können die Nanodrähte innerhalb der Nanodraht-Gräben bzw. innerhalb der Röhren einander auch kontaktieren bzw. eine inhomogene Beabstandung zueinander aufweisen.
- 30 Die Gateschicht/die Gatebänder weisen vorzugsweise eine Schichtdicke/Bandweite auf, die ungefähr ein Drittel des Abstands zwischen dem Sourcekontakt und dem Drainkontakt beträgt. Die Erfindung ist jedoch nicht auf derartige Dicken/Breiten beschränkt, beliebige andere Werte sind eben-
- 35 falls möglich.

- Die Gatebänder können jeweils aus einer zusammenhängenden Schicht bestehen oder jeweils in mehrere voneinander isolierte Gate-Unterbänder aufgespalten sein. Im letzteren fall verläuft die Längsausrichtung jedes Gate-Unterbands senkrecht zur Ausrichtung der Nanodrähte, wobei die Querausrichtung der Gate-Unterbänder der Ausrichtung der Nanodrähte entspricht. Jedes Gateband ist also in mehrere kleine, parallel zueinander verlaufende Bänder aufgeteilt, die die gleiche Ausrichtung wie das Gateband aufweisen.
- Die Gate-Unterbänder sind vorzugsweise einzeln ansteuerbar ausgestaltet, d. h. jedes der Gate-Unterbänder kann auf ein individuelles Potenzial gesetzt werden. Vorteilhafterweise sind die Gate-Unterbänder eines Gatebandes äquidistant voneinander beabstandet. Die vertikalen Positionen der Gate-Unterbänder eines bestimmten Gatebands können gegenüber den vertikalen Positionen der Gate-Unterbänder benachbarter Gatebänder verschoben beziehungsweise gleichgerichtet sein.
- Bei einer Aufspaltung der Gatebänder in Gate-Unterbänder kann die Sperrwirkung des erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters wie folgt verbessert werden: Im Sperrzustand werden die Potenziale der Gate-Unterbänder so gewählt, dass die Band-Gap-Strukturen der Nanodrähte eine wellenförmige Gestalt annehmen. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Potenziale übereinander liegender Gate-Unterbänder alternierende Werte aufweisen, d. h. zwei unmittelbar übereinander angeordnete Gate-Unterbänder weisen unterschiedliche Potenziale auf, das Potenzial jedes zweiten Gate-Unterbands hat hingegen denselben Wert. Die benachbarten Gate-Unterbänder auf einer Ebene (gleiche vertikale Position) sollten im Sperrzustand in diesem Beispiel dasselbe Potenzial aufweisen. Die alternierende Potenzialstruktur bewirkt, dass das Band-Gap (Bandabstand) der zwischen den benachbarten Gate-Unterbänder liegenden Nanodrähte in eine wellenförmige Struktur gebogen wird. Die wellenförmige Struktur bewirkt hierbei ein Einfangen von Elektronen bzw. Löchern, die sich

zwischen dem Source- und Drainkontakt bewegen, womit der Stromfluss zwischen Source- und Drainkontakt behindert wird, was wiederum die Sperrfähigkeit des Halbleiter-Leistungsschalters verbessert. Im Durchlasszustand des Halbleiter-Leistungsschalters werden die Gate-Unterbänder eines Gatebands hingegen auf gleiches Potenzial gesetzt, d.h. in diesem Fall werden alle Gate-Unterbänder auf dasselbe Potenzial gesetzt. Damit wird die wellenförmige Bandstruktur aufgehoben und eine Verbesserung der Durchlasseigenschaften der Halbleiterstruktur (Nanodrähte) für Löcher und Elektronen erzielt.

- Die Nanodrähte sind in einer bevorzugten Ausführungsform halbleitende Kohlenstoff-Nanoröhren. Die Nanodrähte können
- 15 - Silizium;
 - Germanium;
 - zumindest einen der III-V-Halbleiter BN, BP, BAs, AlN, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb;
 - 20 - zumindest einen der II-VI-Halbleiter ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, HgS, HgSe, HgTe, BeS, BeSe, BeTe, MgS, MgSe;
 - zumindest eine der Verbindungen GeS, GeSe, GeTe, SnS, SnSe, SnTe, PbO, PbS, PbSe, PbTe,
 - 25 - zumindest eine der Verbindungen CuF, CuCl, CuBr, CuI, AgF, AgCl, AgBr, AgI;

enthalten oder einer Kombination aus diesen Materialien enthalten bzw. aus diesen Materialien bestehen. Die Nanodrähte können p-dotiert oder n-dotiert sein.

- Die Erfindung stellt weiterhin ein Verfahren zum Herstellen eines Halbleiter-Leistungsschalters bereit, das die folgenden Schritte aufweist:
- 35 - Ausbilden einer Schichtstruktur auf einem Drainkontakt, die eine erste Isolationsschicht, eine darüber angeordnete

Gateschicht und eine über der Gateschicht angeordnete zweite Isolationsschicht aufweist,

- Ausbilden von Gräben in der Schichtstruktur,
- Ausbilden von Nanodrähten innerhalb Gräben, und
- 5 - Ausbilden eines Sourcekontakts auf der Oberseite der Schichtstruktur.

Vorzugsweise erfolgen nach Ausbilden der Schichtstruktur folgende Schritte:

- 10 - Ausbilden von ersten Gräben in der Schichtstruktur,
- Auffüllen der ersten Gräben mit Gateoxid,
- Ausbilden von zweiten Gräben im Gateoxid, wobei die zweiten Gräben bis zum Drainkontakt reichen,
- Ausbilden von Nanodrähten innerhalb zweiter Gräben, und
- 15 - Ausbilden eines Sourcekontakts auf der Oberseite der Schichtstruktur. Die ersten Gräben werden vorzugsweise ebenfalls bis hinab zum Drainkontakt ausgebildet, dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

- 20 Der Drainkontakt ist vorzugsweise ein Molybdän- oder Tantalblech, kann aber auch ein Siliziumsubstrat sein, das mit einer Metallschicht versehen ist. Zur Verbesserung des Aufwuchsverhaltens der Nanodrähte kann vor deren Ausbildung auf dem Molybdän- oder Tantalblech oder dem Siliziumsubstrat vor
- 25 Ausbilden der Schichtstruktur bzw. unmittelbar vor Ausbilden der Nanodrähte (d. h. nach Ausbilden der Gräben) ein Katalysator abgeschieden werden. Zur Stabilisierung des Herstellungsverfahrens kann der Drainkontakt zunächst auf einem Opfersubstrat ausgebildet werden, das nach Fertigstellung des
- 30 Halbleiter-Leistungsschalters dann aufgelöst wird.

Die Erfindung wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Figuren in beispielsweiser Ausführungsform näher erläutert. Es zeigen:

35

Fig. 1 eine erste bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Halbleiter-

Leistungsschalters in Querschnittsdarstellung.

- 5 Fig. 2 eine zweite bevorzugte Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters in Querschnittsdarstellung.
- 10 Fig. 3a bis 3d einen ersten bis vierten Prozessschritt einer bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens zur Herstellung des in Fig. 2 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalters.
- 15 Fig. 4 eine erste Ausführungsform des in Fig. 2 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalters in einer Draufsicht.
- 20 Fig. 5 eine zweite Ausführungsform des in Fig. 2 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalters in einer Draufsicht.
- 25 Fig. 6 eine dritte bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters in Querschnittsdarstellung.
- 30 Fig. 7 eine Bandstruktur, die in einem Sperrzustand in dem in Fig. 6 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalter auftritt.
- 35 Fig. 8 eine Bandstruktur, die im Durchlasszustand in dem in Fig. 6 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalter auftritt.

- Fig. 9 ein Diagramm, das die Abhängigkeit des Einschaltwiderstands von der Nanodrahtdicke verdeutlicht.
- 5 Fig. 10 ein Diagramm, das die Abhängigkeit der maximal möglichen Stromdicke von der Nanodrahtdicke illustriert.
- 10 Fig. 11 ein Diagramm, das den Zusammenhang einer maximal möglichen Nanodrahtdicke bei einer vorgegebenen Spannungsdifferenz zwischen Nanodrähten und dem Gate für den in Fig. 1 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalter illustriert.
- 15 Fig. 12 ein Diagramm, das eine maximal mögliche Stromdicke durch den Halbleiter-Leistungsschalter in Abhängigkeit der Nanodrahtdicke illustriert.
- 20 In den Figuren sind identische bzw. einander entsprechende Teile mit denselben Bezugsziffern gekennzeichnet.
- 25 Eine in Fig. 1 gezeigte erste Ausführungsform 1 eines erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters weist einen Sourcekontakt 2, einen Drainkontakt 3, eine Mehrzahl von Nanodrähten 4, ein Gate 5, einen Gateanschluss 6, eine erste Isolationsschicht 7, und eine zweite Isolationsschicht 8 auf.
- 30 Die Nanodrähte 4 sind parallel und im Wesentlichen äquidistant zueinander angeordnet, wobei die oberen Enden der Nanodrähte 4 mit dem Sourcekontakt 2, und die unteren Enden der Nanodrähte 4 mit dem Drainkontakt 3 elektrisch in Verbindung stehen. Das Gate 5 ist in Form einer Gateschicht ausgestaltet, die von den Nanodrähten 4 durchstoßen werden, wobei die
- 35 Nanodrähte 4 gegenüber dem Gate 5 (der Gateschicht) elektrisch isoliert sind. Damit ist eine koaxiale Anordnung der

Gateelektrode gegenüber den Nanodrähten gegeben, so dass man die bestmögliche kapazitive Kopplung der Gate-Elektrode an den Nanodraht erhält. Die Länge der Nanodrähte beträgt vorzugsweise $((0,2 \mu\text{m}) * (\text{Maximalwert der an dem Halbleiter-Leistungsschalter anliegenden Spannung (in Volt)}))$. Die Dicke der Gateschicht 5 beträgt vorzugsweise ein Drittel des Abstandes zwischen dem Sourcekontakt 2 und dem Drainkontakt 3. Die Gateschicht 5 sollte sich näher an demjenigen Kontakt befinden, dessen Potenzial dem Erdungspotenzial am nächsten liegt (hier: dem Drainkontakt). Die Gateschicht 5 kann beispielsweise eine quadratische, kreisförmige oder auch ringförmige Form aufweisen.

Wie bereits erwähnt, empfiehlt sich je nach zu erzielender Spannungsfestigkeit des Halbleiter-Leistungsschalters eine Länge der Nanodrähte von $0,2 \mu\text{m}$ pro angelegtem Volt Spannung, d. h. bei 100 Volt Betriebsspannung beispielsweise eine Länge von 15 bis $25 \mu\text{m}$. Nanodrähte dieser Länge weisen eine sehr hohe Mobilität von ca. $100.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ auf.

Der in Fig. 1 gezeigte Aufbau lässt sich insbesondere auf quadratmillimeter- bzw. quadratzentimetergroße Halbleiter-Leistungsschalter anwenden. Die Erfindung ist jedoch nicht hierauf beschränkt, eine Anwendung auf kleinere bzw. größere Halbleiter-Leistungsschalter ist ebenfalls denkbar.

In Fig. 9 ist der erzielbare Einschaltwiderstand der in Fig. 1 gezeigten Anordnung in Abhängigkeit der Nanodrahtdichte aufgezeigt. Die mit Bezugsziffer 9 gekennzeichnete Kennlinie entspricht einem angenommenen Einschalt-Widerstandswert von $500 \text{ k}\Omega$ pro Nanodraht, die mit Bezugsziffer 10 gekennzeichnete Kennlinie einem angenommenen Einschalt-Widerstandswert von $200 \text{ k}\Omega$ pro Nanodraht. Die mit Bezugsziffer 11 gekennzeichnete Kennlinie entspricht der derzeit bestmöglichen Kennlinie eines herkömmlichen Halbleiter-Leistungsschalters, der beispielsweise auf Silizium-Technologie basiert. Aus Fig. 9 ist ersichtlich, dass die Eigenschaften des in Fig. 1 gezeigten

Halbleiter-Leistungsschalters wesentlich besser sind als die eines herkömmlichen Halbleiter-Leistungsschalters.

5 In diesem Zusammenhang sei noch auf Fig. 10 eingegangen, die die Stromtragfähigkeit der in Fig. 1 gezeigten Anordnung in Abhängigkeit der Nanodrahtdicke zeigt. Bezugsziffer 12 bezeichnet hierbei die derzeit bestmögliche Kennlinie eines herkömmlichen Halbleiter-Leistungsschalters, Bezugsziffer 13 die Kennlinie des in Fig. 1 gezeigten erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters. Es ist deutlich zu sehen, dass der
10 erfindungsgemäße Halbleiter-Leistungsschalter die besseren Werte aufweist.

Die in Fig. 1 gezeigte Ausführungsform kann beispielsweise
15 wie folgt hergestellt werden: Zunächst wird auf einem NaCl-, SiO₂-, Si- oder einem sonstigen Substrat ein Kontaktmaterial, beispielsweise Molybdän, aufgebracht. Auf dem Substrat wird ein geeigneter Katalysator abgeschieden. Beispielsweise eignet sich Eisen, Nickel, Kobalt oder Verbindungen dieser Elemente für das Aufwachsen von Si-Nanodrähten oder Nanodrähten aus II-V oder IV Halbleitern. Für den speziellen Fall von Kohlenstoffnanoröhren sollte der Katalysator ein silizidbildendes Material sein wie z. B. Gold, Silber oder Platin. So
20 dann wird die erste Isolationsschicht 7 (beispielsweise Oxid), auf der wiederum die Gateschicht 5 abgeschieden wird, aufgebracht. Die Gateschicht 5 wird strukturiert und mit Dielektrikum versehen, d.h. die Gateschicht mit Löchern, die bis zur Isolationsschicht 7 reichen, versehen und diese Löcher dann erneut durch eine Isolationsschicht aufgefüllt. Auf der
25 Gateschicht 5 wird die zweite Isolationsschicht 8 aufgebracht. Sodann werden Löcher in die Schichtstruktur aus erster Isolationsschicht 7, Gateschicht 5, und zweiter Isolationsschicht 8 geätzt und in den Löchern Nanoröhren bzw. Nanodrähte gewachsen.

35

Alternativ hierzu können ein Schichtstapel, bestehend aus erster Isolationsschicht 7, Gate 5, und zweiter Isolations-

- schicht 8 abgeschieden, und mit einem Trockenätzprozess Löcher bis zum Boden geätzt werden. Die Löcher werden nochmals durch Abscheidung einer Isolationsschicht mit einem Atomic-Layer-Deposition- (ALD) oder einem CVD-Verfahren verjüngt, wobei gleichzeitig das Gateoxid über dem Gate realisiert wird. Ein Spacer-Ätzprozess legt dann erneut den Boden/Katalysator frei, und die Nanodrähte 4 werden in den erzeugten Löchern gewachsen.
- Eventuelle Hohlstellen können beispielsweise mit einem Spin-on-Glas versiegelt werden. Elektrodenposition ist möglich. Auf die Oberseite der Schichtstruktur wird der Sourcekontakt 2 aufgebracht. Das Substrat (Opfersubstrat) wird aufgelöst, womit das Kontaktmaterial (Drainkontakt 3) freigelegt wird.
- In Fig. 2 ist eine zweite Ausführungsform 20 des erfindungsgemäßen Halbleiter-Leistungsschalters gezeigt. Ein wesentlicher Unterschied zu der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform ist, dass das Gate in Form mehrerer Gatebänder 5' realisiert ist, deren Längsausrichtung jeweils senkrecht zur Ausrichtung der Nanodrähte 4 verläuft, also aus der Zeichenebene heraus bzw. in die Zeichenebene hinein zeigt, und deren Querausrichtung der Ausrichtung der Nanodrähte 4 entspricht. Die Nanodrähte 4 sind innerhalb von Gräben 21 angeordnet. Jedes Gateband 5' wird durch Isolierschichten (Gateoxidschichten) 22 gegenüber den Nanodrähten 4 elektrisch isoliert. Oberhalb und unterhalb der Gatebänder 5' sind weitere Isolierschichten (Oxidschichten) 23 vorgesehen.
- In Fig. 4 und 5 sind Draufsichten zwei möglicher Ausführungsformen des in Fig. 2 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalters veranschaulicht. In Fig. 4 sind die Nanodrähte 4 inhomogen innerhalb der Gräben 21 verteilt, in Fig. 5 sind innerhalb der Gräben 21 mehrere Röhren 24 vorgesehen, wobei innerhalb jeder Röhre 24 wenigstens ein Nanodraht 4 verläuft. Auch bei der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform beträgt eine Breite B

der Gatebänder 5' vorzugsweise ein Drittel des Abstands zwischen dem Sourcekontakt 2 und dem Drainkontakt 3.

5 Im Folgenden soll unter Bezugnahme auf die Figuren 3a bis 3d eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens des in Fig. 2 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalters näher erläutert werden.

10 In einem ersten Schritt (Fig. 3a) wird auf einem Drainkontakt 3 eine erste Isolationsschicht 7, darauf eine Gateschicht 5, und darauf wiederum eine zweite Isolierschicht 8 aufgebracht. In einem zweiten Schritt (Fig. 3b) werden in der so entstandenen Schichtstruktur erste Gräben 25 ausgebildet, beispielsweise durch einen Ätzprozess. Durch das Ausbilden der ersten
15 Gräben 25 entstehen Gatebänder 5' sowie darauf bzw. darunter angeordnete Isolierschichten 23. Die ersten Gräben 25 reichen vorzugsweise bis zum Drainkontakt 3 hinab.

20 In einem dritten Schritt (Fig. 3c) werden die ersten Gräben 25 mit einem Isolationsmaterial aufgefüllt, und anschließend in dem Isolationsmaterial zweite Gräben 26 ausgebildet. Die zweiten Gräben 26 reichen bis zum Drainkontakt 3 hinab. Die Gatebänder 5' bzw. die darüber/darunter liegenden Isolations-
25 schichten 23 sind nach diesem Prozessschritt von Isolierschichten 22 umgeben.

In einem vierten Prozessschritt (Fig. 3d) werden in den zweiten Gräben 26 Nanodrähte 4 aufgewachsen. Anschließend erfolgt die Ausbildung eines Sourcekontakts 2.

30 Die in Fig. 2 gezeigte Ausführungsform hat gegenüber der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform den Vorteil, dass die "Durchschlagsfestigkeit" des Halbleiter-Leistungsschalters bei gleichzeitiger Wahrung einer hohen Nanodraht-Dichte höher
35 ist:

Der in Fig. 1 gezeigte Halbleiter-Leistungsschalter hat den Nachteil, dass bei Anliegen von hohen Spannungen auch entsprechend dicke Isolierschichten, die die Nanodrähte gegenüber dem Gate 5 isolieren, verwendet werden müssen, um einen Durchschlag durch die Isolierschicht zu verhindern. Bei einer anzulegenden Spannung von 100 V sollte beispielsweise die Dicke der Isolierschicht mindestens 100 nm betragen. Dies würde jedoch bedeuten, dass bei einer coaxialen Realisierung in Fig. 1 unter Verwendung einer hexagonal dichtesten Packung von Nanodrähten maximal eine Dichte von 20 Nanodrähten pro μm^2 möglich wären, was herkömmliche Siliziumschalter nur um einen Faktor 2 hinsichtlich der Einschaltwiderstände und um einen Faktor 10 hinsichtlich der Strombelastbarkeit verbessern würde. Die in Fig. 2 gezeigte Ausführungsform verwendet deshalb parallele Gatebänder 5' für den Halbleiter-Leistungsschalter mit vertikal ausgerichteten Nanodrähten 4. Mit dieser Ausführungsform können trotz Spannungen von ca. 500 V Dichten von ungefähr 2000 Nanodrähten (beispielsweise Carbon-Nanodrähte oder Silizium-Nanodrähte) pro μm^2 erzielt werden.

Die Dicke des Drainkontakts beträgt ungefähr 10 bis 200 μm , wobei der Drainkontakt 3 vorzugsweise aus Molybdän oder Tantal besteht bzw. diese Materialien enthält. Auf dem Drainkontakt 3 ist zudem vorzugsweise eine Katalysatorschicht aufgebracht.

In diesem Zusammenhang sei noch auf die Fig. 11 und 12 verwiesen. Fig. 11 zeigt die maximal mögliche Nanodrahtdichte in Abhängigkeit angenommener Spannungsdifferenzen zwischen Nanodrähten und Gate für den in Fig. 1 gezeigten Halbleiter-Leistungsschalter mit coaxialem Gate für jeweils einen einzigen Nanodraht. Es ist zu sehen, dass bei hohen Spannungsdifferenzen nur geringe Nanodrahtdichten möglich sind. In Fig. 12 ist die Stromdichte gegenüber der Nanodrahtdichte für einen herkömmlichen Halbleiter-Leistungsschalter (Kennlinie 27) und für das in Fig. 2 gezeigte erfindungsgemäße Halbleiter-

Leistungsbauteil (Kennlinie 28) gezeigt ("CNT" entspricht "Carbon-Nanotube" bzw. "Carbon-Nanoröhre"). Die Kennlinie 27 gilt insbesondere für Silizium-Leistungsschalter.

5 In Fig. 6 ist eine dritte Ausführungsform 30 des erfindungs-
gemäßen Halbleiter-Leistungsschalters gezeigt. Diese Ausfüh-
rungsform unterscheidet sich von der in Fig. 2 gezeigten Aus-
führungsform dadurch, dass die in Fig. 2 gezeigten Gatebänder
10 5' jeweils in mehrere Gate-Unterbänder 5'' aufgespalten sind.
Die Gate-Unterbänder 5'' sind gegeneinander elektrisch iso-
liert und in dieser Ausführungsform äquidistant voneinander
beabstandet. Jedes der Gate-Unterbänder 5'' kann unabhängig
von den anderen Gate-Unterbändern 5'' auf einen individuellen
15 Potenzialwert gelegt werden. Wenn die Gate-Unterbänder 5''
eines Gatebands 5' alternierend auf eine positive/negative
Gatespannung gelegt werden, so lässt sich eine wellenförmige
Bandabstandsstruktur ("band gap") erzeugen, so wie in Fig. 7
schematisch dargestellt. Die wellenförmige Bandabstandsstruk-
tur 31 bewirkt, dass Löcher, die von dem Drainkontakt 3 zu
20 dem Sourcekontakt 2 wandern wollen "eingefangen" werden. Ä-
quivalentes gilt auch für die Elektronen, die in Fig. 7 nicht
explizit eingezeichnet sind, in Fig. 7 aber von der mit Be-
zugsziffer 2 gekennzeichneten Elektrode zu der mit Bezugszif-
fer 3 gekennzeichneten Elektrode tunneln. Damit lassen sich
25 die Sperreigenschaften des Halbleiter-Leistungsschalters we-
sentlich verbessern: Im Sperrzustand werden, wie oben be-
schrieben, die Gate-Unterbänder 5'' mit Spannung versorgt, so
dass die in Fig. 7 gezeigte wellenförmige Bandabstandsstruk-
tur entsteht. Im Durchlasszustand des Halbleiter-
30 Leistungsschalters werden hingegen sämtliche Gate-Unterbänder
5'' eines Gatebands 5' mit derselben Gatespannung beauf-
schlagt, so dass die in Fig. 8 gezeigte Bandabstandsstruktur
32 entsteht. Löcher können nun ungehindert von dem Drainkon-
takt 3 zu dem Sourcekontakt 2 wandern.

35

Die in Fig. 6 gezeigte dritte Ausführungsform 30 ermöglicht
demnach, unter normalen Umständen auftretende Tunneleffekte

von Elektronen/Löchern durch die an den Sourcekontakt 2 und dem Drainkontakt 3 vorhandene Schottky-Barriere durch Ausbilden der wellenförmigen Band-Gap-Struktur 31 im Sperrzustand zu unterdrücken. Dazu werden die Gate-Unterbänder 5'' abwechselnd "gebiased", wodurch ein hohes Abschnürverhalten der Ladungsträger resultiert, wobei die Abschnürstärke exponentiell mit der Anzahl n der \pm -modulierten Gebiete ansteigt. Damit kann bei gleichem Durchlassstrom im Durchlasszustand der Tunnelstrom (Leckstrom) im Sperrzustand um einen Faktor e^n reduziert werden. "eV" bezeichnet hierbei die angelegte Spannung. Da es sich um ein Energiediagramm handelt ist diese Spannung mit "e" multipliziert.

Erfindungsgemäß werden demnach Gatestrukturen mit abwechselnd leitenden und nicht-leitenden Schichten vorgesehen, die mit abwechselnder Polarität als multiple Gateanordnung verschaltet werden.

20

Literatur:

- Volume 88, No. 25, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 24. Juni 2002
"Multiple Functionality in Nanotube Transistors"
François Léonard and J. Tersoff
- 25 Volume 85, No. 22, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 27. November 2000
"Negative Differential Resistance in Nanotube Devices"
François Léonard and J. Tersoff

Bezugszeichenliste

	1	erste Ausführungsform
	2	Sourcekontakt
5	3	Drainkontakt
	4	Nanodraht
	5	Gate
	5'	Gateband
	5''	Gate-Unterband
10	6	Gateanschluss
	7	erste Isolationsschicht
	8	zweite Isolationsschicht
	9	Kennlinie
	10	Kennlinie
15	11	Kennlinie
	12	Kennlinie
	13	Kennlinie
	20	zweite Ausführungsform
	21	Graben
20	22	Isolierschicht
	23	Isolierschicht
	24	Röhre
	B	Breite des Gatebands
	25	erste Gräben
25	26	zweite Gräben
	27	Kennlinie
	28	Kennlinie
	30	dritte Ausführungsform
	31	Bandabstandsstruktur
30	32	Bandabstandsstruktur

Patentansprüche

1. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30), mit:
- einem Sourcekontakt (2),
 - 5 - einem Drainkontakt (3),
 - einer zwischen Sourcekontakt (2) und Drainkontakt (3) vorgesehenen Halbleiterstruktur, und
 - einem Gate (5), über das ein Stromfluss zwischen Sourcekontakt (2) und Drainkontakt (3) durch die Halbleiterstruktur hindurch steuerbar ist,
 - 10 - dadurch gekennzeichnet,
- dass die Halbleiterstruktur mehrere parallel geschaltete Nanodrähte (4) aufweist, die so angeordnet sind, dass jeder Nanodraht (4) eine elektrische Verbindung zwischen dem Sourcekontakt (2) und dem Drainkontakt (3) ausbildet.
- 15 2. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,
- dass die Länge der Nanodrähte (4) $((0,2\mu\text{m}) * (\text{Maximalwert der an dem Halbleiter-Leistungsschalter anliegenden Spannung (in V)}))$ beträgt.
- 20 3. Halbleiter-Leistungsschalter (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
- 25 dass das Gate (5) in Form einer Gateschicht realisiert ist, die zwischen dem Sourcekontakt (2) und dem Drainkontakt (3) vorgesehen ist und von den Nanodrähten (4) durchsetzt wird, wobei die Nanodrähte (4) gegenüber der Gateschicht (5) elektrisch isoliert sind.
- 30 4. Halbleiter-Leistungsschalter (20, 30) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
- 35 dass das Gate (5) in Form mehrerer Gatebänder (5') realisiert ist, deren Längsausrichtung jeweils im Wesentlichen senkrecht zur Ausrichtung der Nanodrähte (4) verläuft, und deren Querausrichtung der Ausrichtung der Nanodrähte (4) entspricht,

-20-

wobei die Nanodrähte gegenüber dem Gate (5') elektrisch isoliert sind.

5. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach Anspruch 4,
5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass die Nanodrähte (4) innerhalb von Gräben (21) verlaufen,
die zwischen den Gatebändern (5') vorgesehen sind.

6. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach Anspruch 4
10 oder 5,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass die Gatebänder (5') und/oder Gräben (1) äquidistant voneinander beabstandet sind.

15. 7. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach Anspruch 5
oder 6,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass innerhalb der Gräben (21) Röhren (24) vorgesehen sind,
innerhalb derer jeweils wenigstens ein Nanodraht (4) ver-
20 läuft.

8. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der
Ansprüche 5 bis 7,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
25 dass zwischen den Gräben (21) und den Gatebändern (5') Isolationsschichten (22) vorgesehen sind.

9. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der
vorstehenden Ansprüche,
30 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass die Nanodrähte (4) gegeneinander isoliert sind.

10. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der
vorstehenden Ansprüche,
35 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass die Nanodrähte (4) gleichmäßig voneinander beabstandet
sind.

11. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der Ansprüche 3 bis 10,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

5 dass die Gateschicht/die Gatebänder (5, 5') eine Schichtdicke/Bandbreite aufweisen, die ungefähr $1/3$ des Abstands zwischen dem Sourcekontakt (2) und dem Drainkontakt (3) beträgt.

12. Halbleiter-Leistungsschalter (30) nach einem der Ansprüche 4 bis 10,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

10 dass jedes Gateband (5') in mehrere gegeneinander isolierte Gate-Unterbänder (5'') aufgespalten ist, wobei die Gate-Unterbänder (5'') übereinander angeordnet und jeweils einzeln
15 ansteuerbar ausgestaltet sind.

13. Halbleiter-Leistungsschalter (30) nach Anspruch 12,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

20 dass die Gate-Unterbänder (5'') eines Gatebands (5') äquidistant voneinander beabstandet sind.

14. Halbleiter-Leistungsschalter (30) nach Anspruch 13,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

25 dass die vertikalen Positionen der Gate-Unterbänder (5'') eines Gatebands (5') gegenüber den vertikalen Positionen der Gate-Unterbänder (5'') eines benachbarten Gatebands (5') verschoben sind.

15. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der vorstehenden Ansprüche,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,

30 dass die Nanodrähte (4) halbleitende Kohlenstoff-Nanoröhren sind.

16. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Nanodrähte (4)
- 5 - Silizium;
- Germanium;
- zumindest einen der III-V-Halbleiter BN, BP, BAs, AlN, AlP, AlAs, AlSb, GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb;
- 10 - zumindest einen der II-VI-Halbleiter ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, HgS, HgSe, HgTe, BeS, BeSe, BeTe, MgS, MgSe;
- zumindest eine der Verbindungen GeS, GeSe, GeTe, SnS, SnSe, SnTe, PbO, PbS, PbSe, PbTe,
- 15 - zumindest eine der Verbindungen CuF, CuCl, CuBr, CuI, AgF, AgCl, AgBr, AgI;
enthalten.
17. Halbleiter-Leistungsschalter (1, 20, 30) nach Anspruch 15 oder 16,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Nanodrähte (4) p-dotiert oder n-dotiert sind.
18. Verfahren zur Verbesserung der Sperrwirkung eines Halbleiter-Leistungsschalters gemäß einem der Ansprüche 12 bis 17,
dadurch gekennzeichnet,
dass im Sperrzustand die Potenziale der Gate-Unterbänder (5'') so gewählt werden, dass die Band-Gap-Strukturen der Nanodrähte eine wellenförmige Gestalt annehmen.
19. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Leistungsschalters, mit den folgenden Schritten:
- 35 - Ausbilden einer Schichtstruktur auf einem Drainkontakt (3), die eine erste Isolationsschicht (7), eine darüber angeordnete Gateschicht (5) und eine über der Gateschicht angeordnete zweite Isolationsschicht (8) aufweist,

-23-

- Ausbilden von Gräben (21) in der Schichtstruktur, die bis zum Drainkontakt (3) reichen,
- Ausbilden von Nanodrähten (4) innerhalb der Gräben (21),
- Ausbilden eines Source-Kontakts (2) auf der Oberseite der Schichtstruktur.

20. Verfahren zur Herstellung eines Halbleiter-Leistungsschalters nach Anspruch 19, gekennzeichnet durch
- 10 die folgenden Schritte:
- Ausbilden von ersten Gräben (25) in der Schichtstruktur,
 - Auffüllen der ersten Gräben (25) mit Gateoxid (22),
 - Ausbilden von zweiten Gräben (26) im Gateoxid, wobei die zweiten Gräben (26) bis zum Drainkontakt (3) reichen,
 - 15 - Ausbilden von Nanodrähten (4) innerhalb der zweiten Gräben (26),
 - Ausbilden eines Source-Kontakts (2) auf der Oberseite der Schichtstruktur.

- 20 21. Verfahren nach Anspruch 19 oder 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Drainkontakt (3) aus Molybdän oder Tantal besteht bzw. diese Materialien enthält.

- 25 22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Molybdän oder Tantal vor Ausbilden der Schichtstruktur beziehungsweise vor Ausbilden der Nanodrähte ein Katalysator abgeschieden wird.

30

1/8

FIG 1

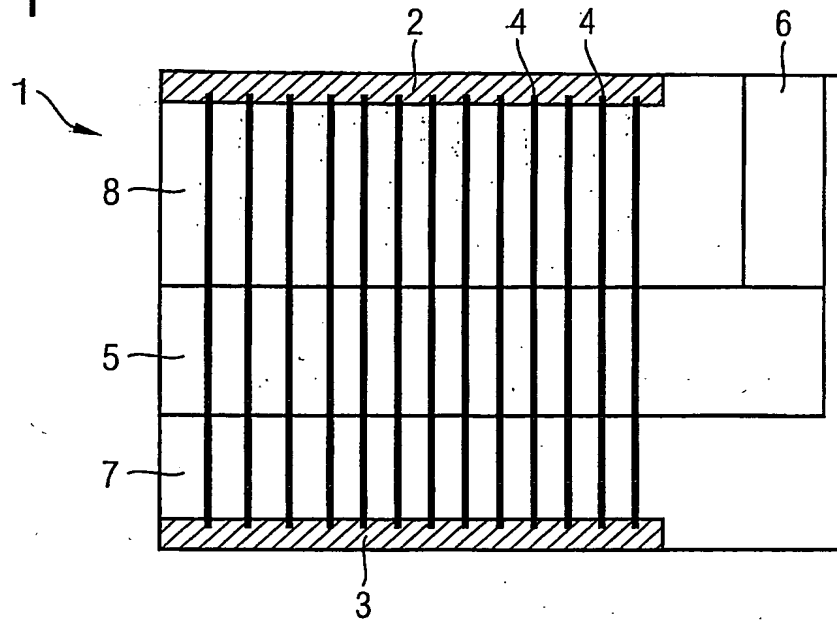


FIG 2

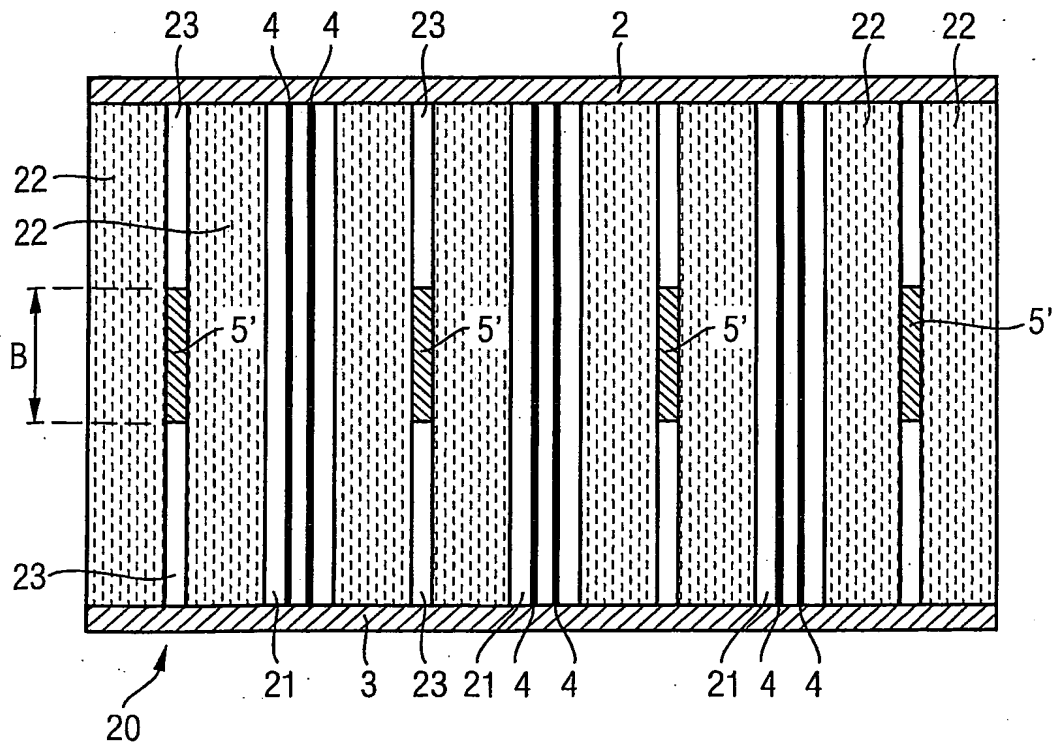


FIG 3A

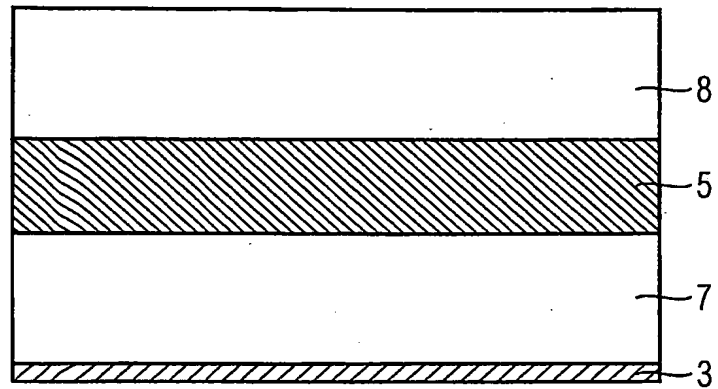
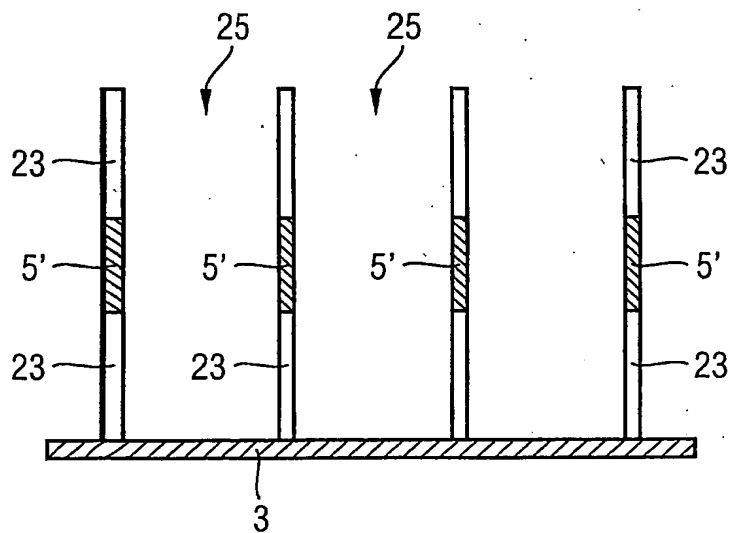


FIG 3B



3/8

FIG 3C

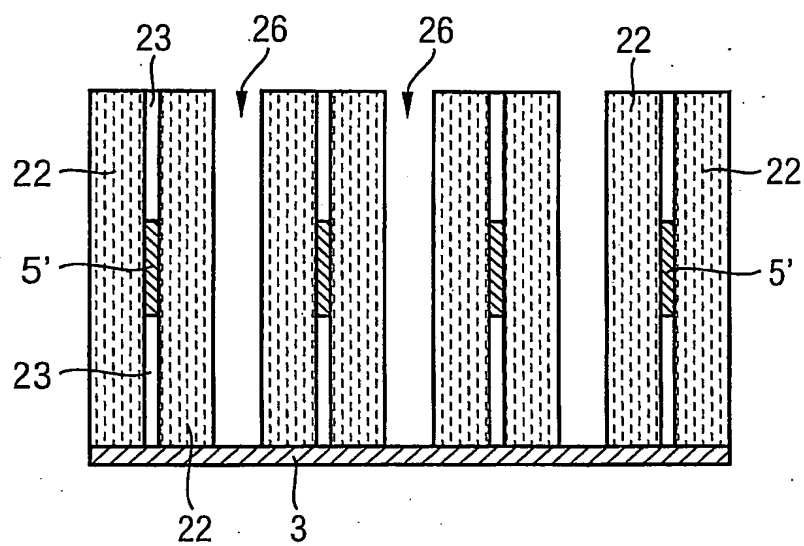
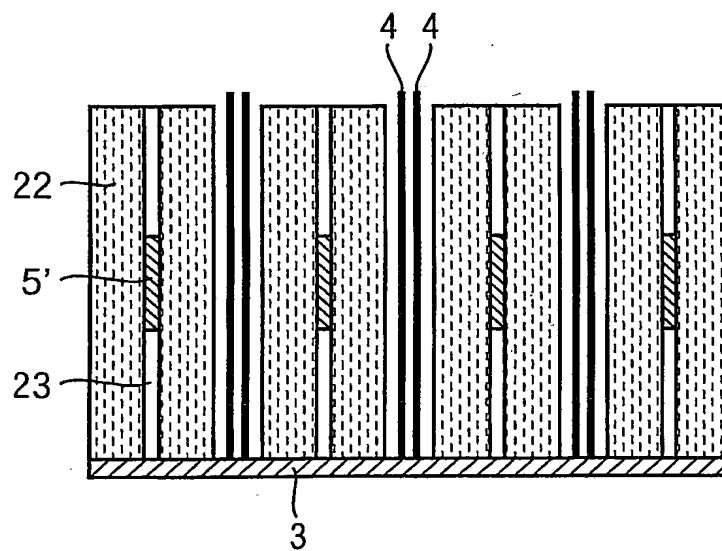


FIG 3D



4/8

FIG 4

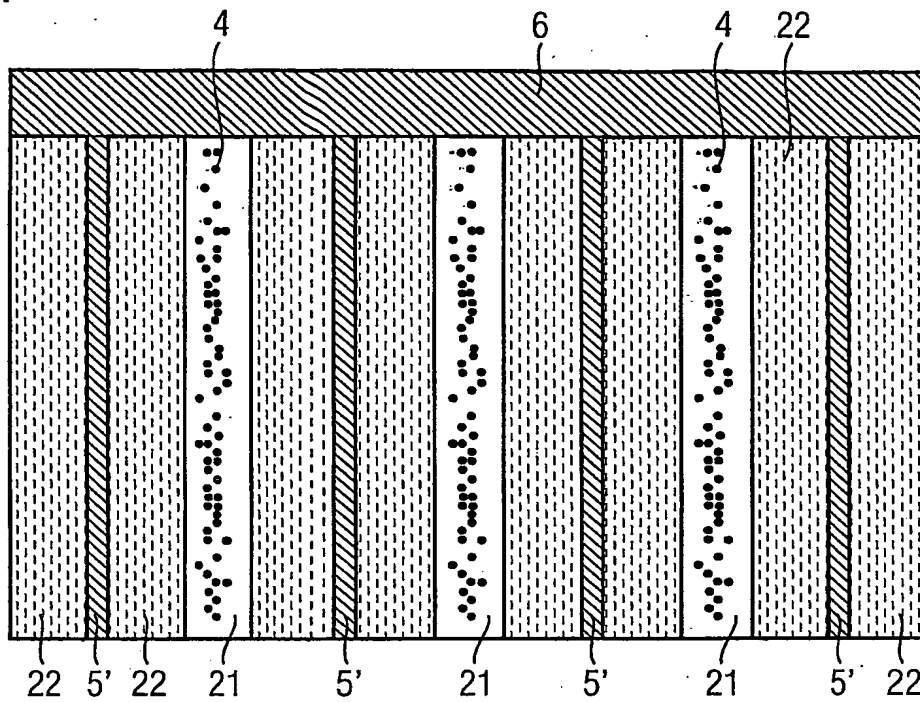
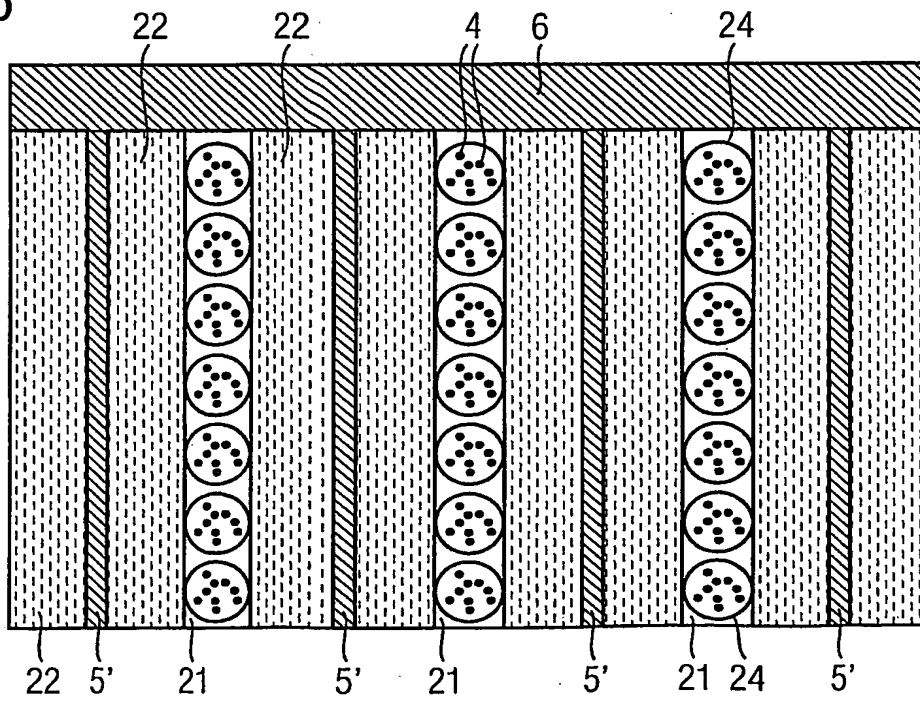


FIG 5



5/8

FIG 6

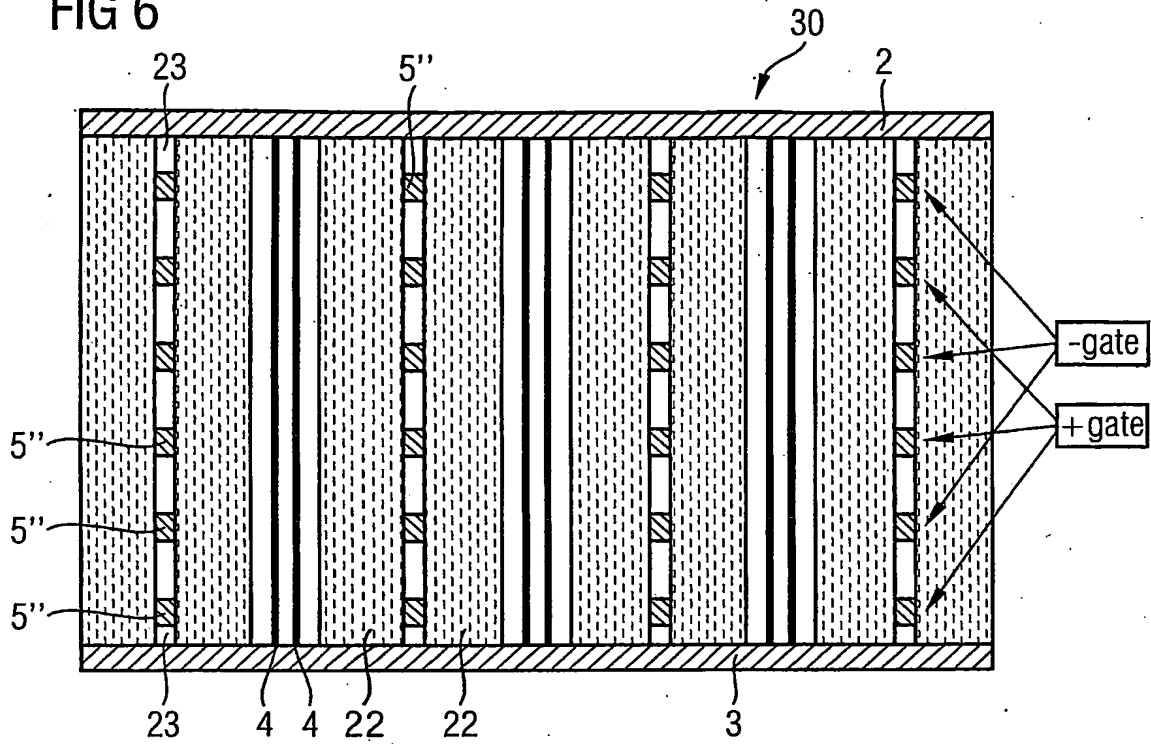


FIG 7

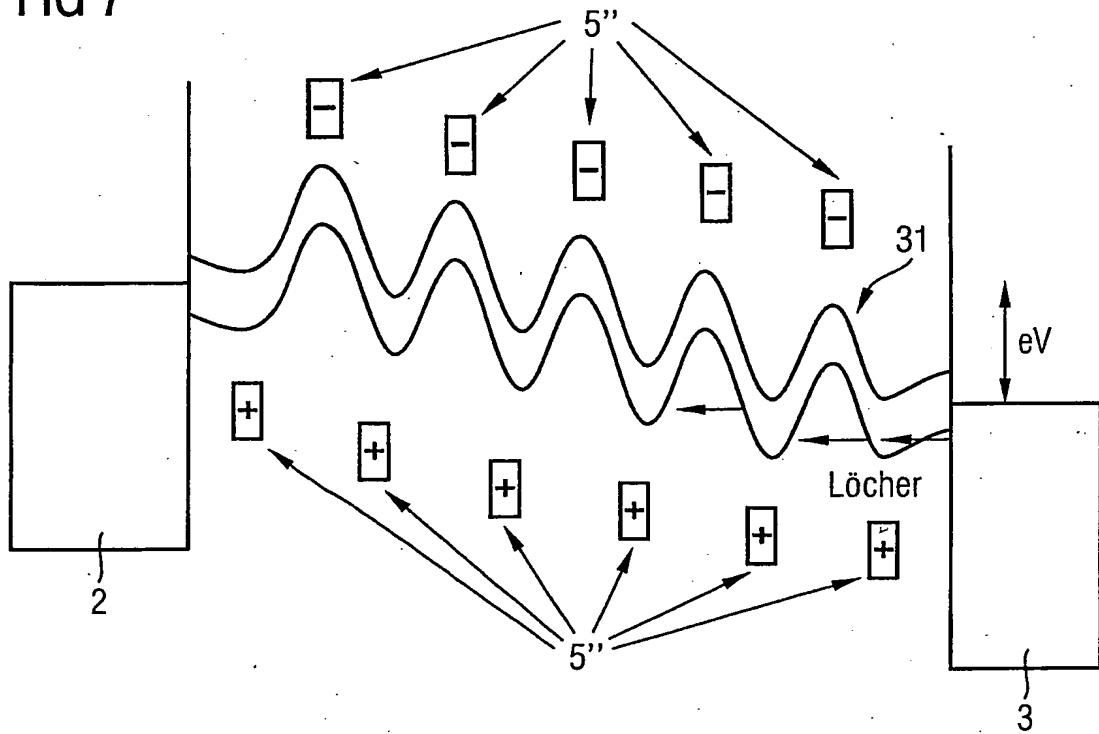


FIG 8

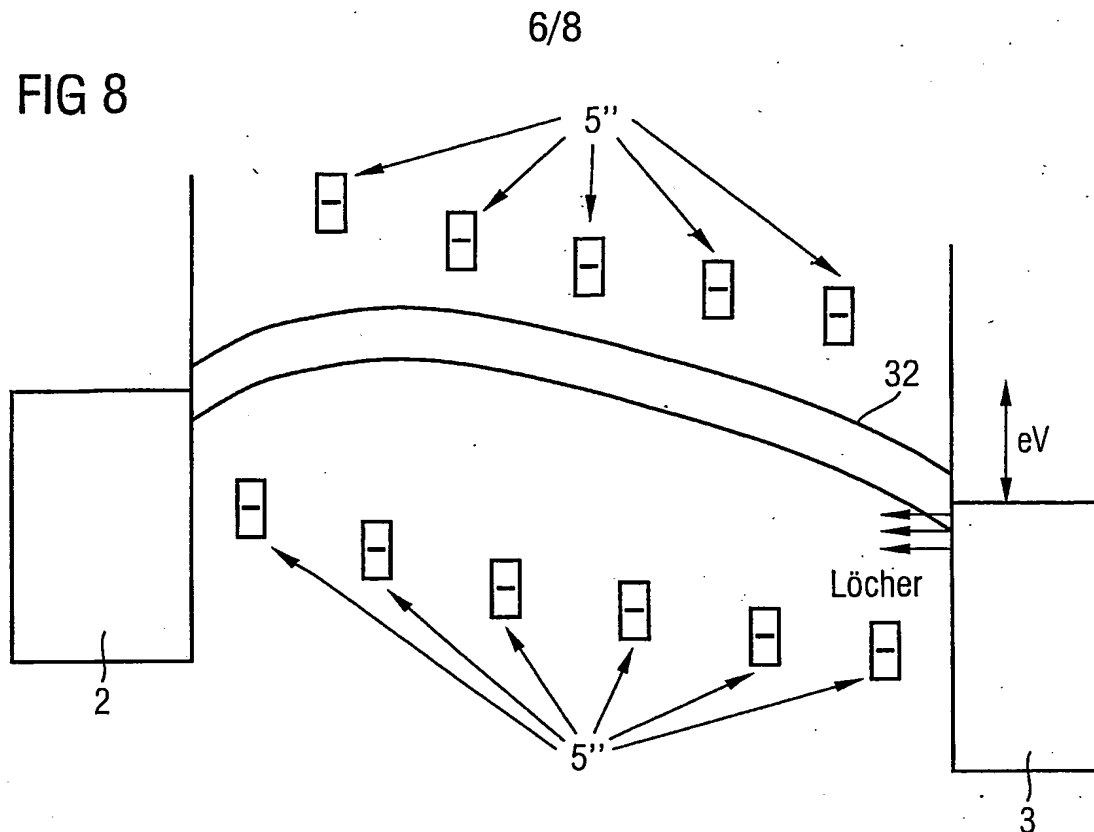


FIG 9

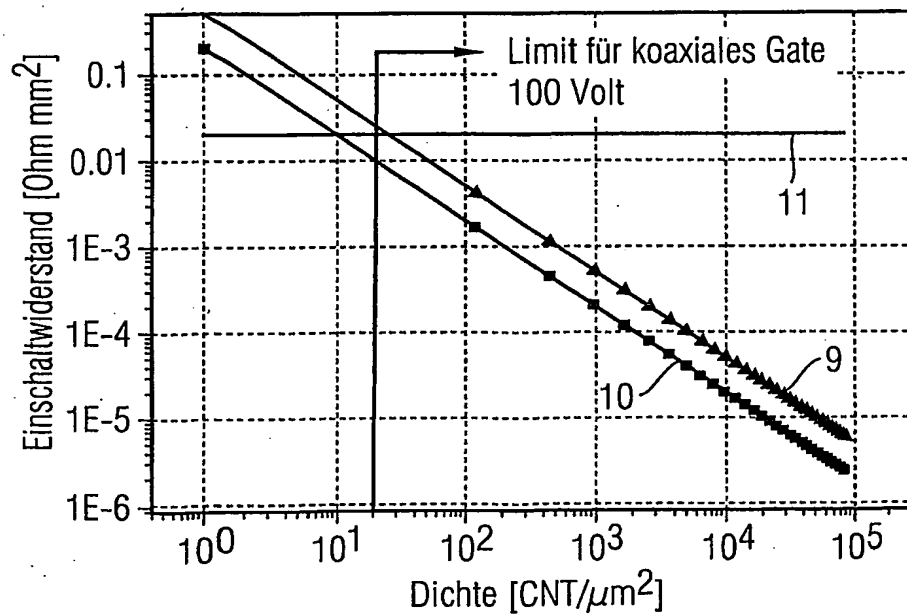


FIG 10

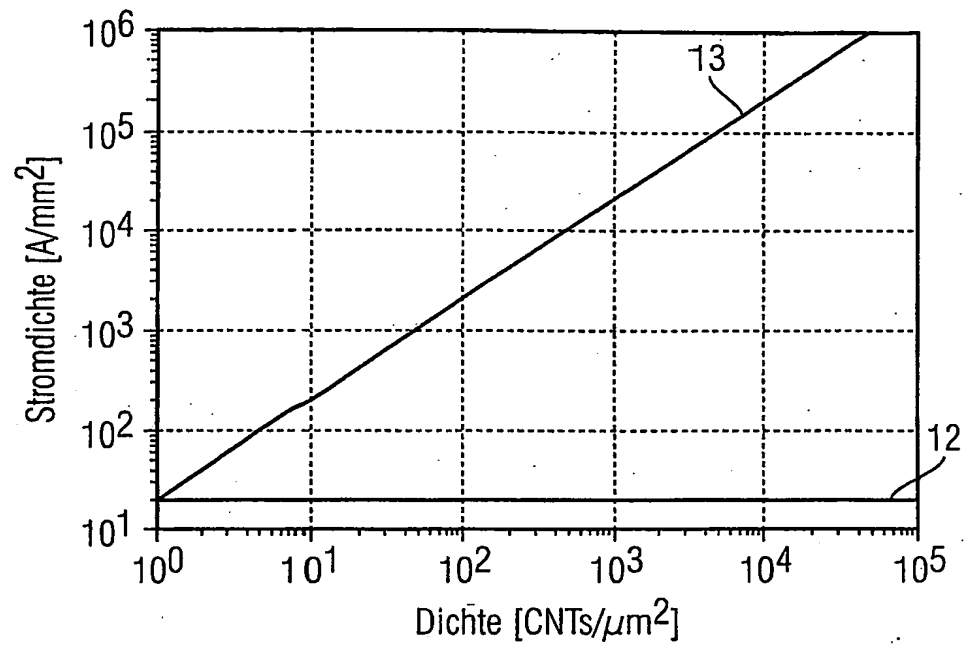


FIG 11

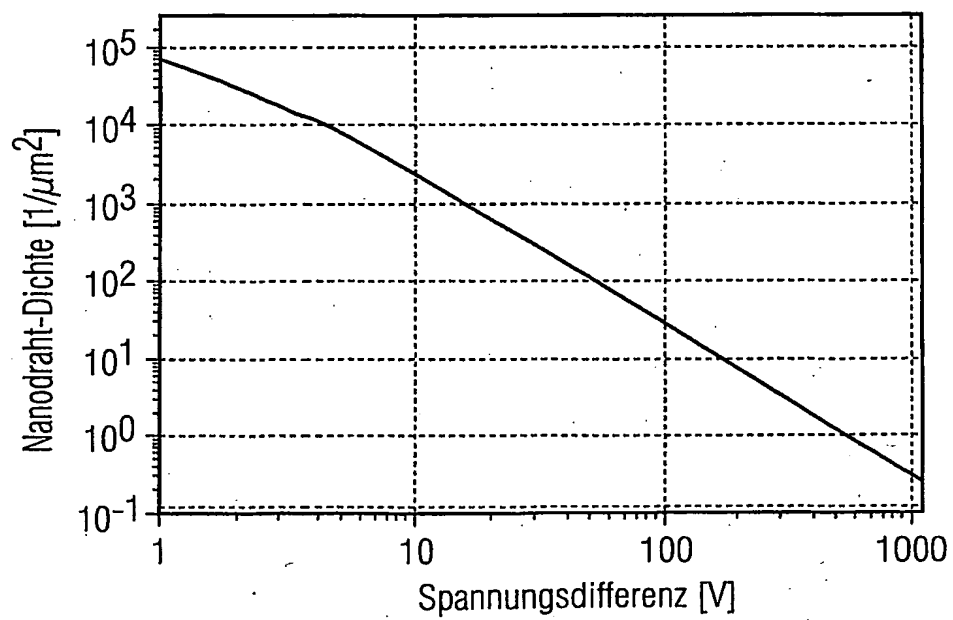


FIG 12

